

半直立式圆筒护岸地基现场加载试验及变形分析

韩冉冉¹, 田双珠¹, 李明玉^{1, 2}

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所水工构造物检测、诊断与加固技术交通行业重点实验室, 天津 300456;

2. 石家庄经济学院, 河北 石家庄 050031)

摘要: 半直立式圆筒护岸是一种新式港口工程结构, 结合其在大连某水工护岸工程中的应用, 进行了半直立式圆筒护岸地基的加载试验, 通过实测土压力、沉降、水平位移及孔隙水压力, 分析了半直立式圆筒护岸地基的沉降及水平位移变化特点, 并进一步研究了其不均匀沉降的发展过程。试验结果表明: 半直立式圆筒护岸沉降及水平位移对护岸荷载分级、每级荷载加载量、加载历时及两级荷载之间的间隔时间较为敏感, 其中护岸后方最后一级不对称加载对圆筒结构的不均匀沉降影响最大, 孔隙水压力变化主要受每级加载量、加载历时及潮汐作用影响, 而圆筒安装及第一级荷载施加后, 孔隙水压力产生较大的波动。

关键词: 半直立式圆筒护岸; 加载试验; 不均匀沉降; 孔隙水压力

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)02-0375-06

作者简介: 韩冉冉(1982-), 男, 山东淄博人, 硕士, 助理工程师, 主要从事软基处理及港口工程等方面的检测与研究。E-mail: nuanxn7758@sina.com。

Field loading tests and deformation of foundation of semi-vertical cylindrical revetment

HAN Ran-ran¹, TIAN Shuang-zhu¹, LI Ming-yu^{1, 2}

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Key Laboratory of Harbor & Marine Safety, Ministry of Transport, Tianjin

300456, China; 2. Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: Semi-vertical cylindrical revetment is a new port engineering structure. Field load tests on a semi-vertical cylindrical revetment is carried out based on its application of a hydraulic revetment in Dalian. The earth pressure, foundation settlement, horizontal movement and pore water pressure of the semi-vertical cylindrical revetment are monitored. The settlement and horizontal movement of foundation of the semi-vertical cylindrical revetment are analyzed, and its non-uniform settlement is further studied. The monitoring results indicate that the sensitive factors affecting the settlement of the semi-vertical cylindrical revetment are loading stage, loading intensity, loading duration and loading intervals. The final unsymmetrical loading behind the revetment has the greatest impact on the non-uniform settlement of cylindrical structure. The variation of pore water pressure is mainly affected by each loading, loading duration and tidal action. When the cylindrical structure is installed and the first level of loading is applied, there is a remarkable fluctuation of pore water pressure.

Key words: semi-vertical cylindrical revetment; load test; non-uniform settlement; pore water pressure

0 引言

近年来, 随着港口工程的兴起及大面积填海造陆工程的开展, 出现了许多新式的港口工程结构型式。半直立式圆筒护岸作为其中一种建于软土地基上的新式港口工程结构, 逐渐得到了应用。其突出优点: 不必清除海底淤泥, 从而有效利用资源和保护环境, 回填土石方量较少, 大大降低工程成本。但其缺点也较明显: 高压缩性海底淤泥物理性质差, 对施工工艺要求较高, 如果控制不当便会引起地基变形过大, 甚至造成地基失稳。因此, 急需通过试验及理论研究半直

立式圆筒护岸的沉降规律, 以便进一步指导工程实践。目前, 研究的重点集中在沉入式圆筒码头或防波堤稳定性^[1-5]和土压力^[6-7]两个方面, 而圆筒结构的试验方法^[7-8]及沉降变形^[9-10]方面的研究较少。如王元战等^[12, 11]采用简化的极限平衡法对大型圆筒海岸结构稳定性进行了分析, 肖忠等^[5]对波浪作用下沉入式圆筒稳定性进行了动力分析。

本文以大连某水工护岸为背景, 结合半直立式圆

筒护岸现场加载试验, 利用实测的土压力、沉降、水平位移及孔隙水压力数据, 分析了半直立式圆筒护岸的变形和孔隙水压力变化规律, 并探讨了加载对圆筒结构不均匀沉降的影响。

1 工程地质条件

大连某围海造陆圆筒护岸工程典型断面结构型式为排水板半直立式圆筒结构, 其中前 180.0 m 范围不进行挖泥, 其余部分挖泥深度在 2.0 m 左右。其具体施工工艺: 先进行基槽挖泥, 接着抛填碎石垫层, 再铺设土工格栅以增强抛石基床的整体性, 然后再抛填碎石垫层和碎石基床, 之后安装上部圆筒结构, 最后进行筒内回填及圆筒两侧的加载, 形成图 1 所示的断面结构。

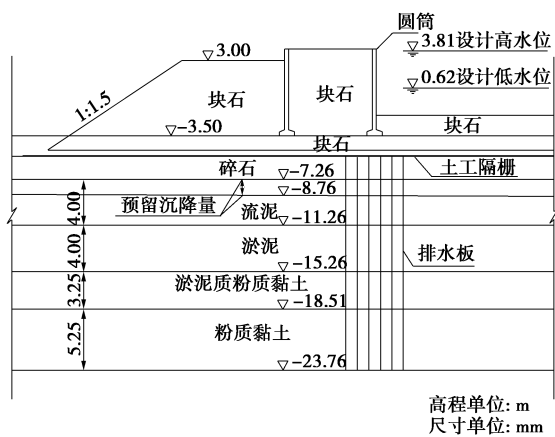


图 1 典型断面示意图

Fig. 1 Sketch of typical section

工程区域地层结构自上而下分别为流泥、淤泥、淤泥质粉质黏土、细砂、粉质黏土、辉绿岩、板岩。其中前 3 层为主要的可压缩土层: ①流泥 (Q^4_m), 灰黑色, 饱和, 流塑, 具腥臭味, 多见贝壳碎片, 顶面高程-9.63~-5.82 m, 底面高程-14.13~-8.08 m, 钻孔揭露厚度 1.8~5.7 m。②淤泥 (Q^4_m), 黑色或黑灰色, 饱和, 流塑, 具腥臭味, 多见贝壳碎片, 顶面高程-14.13~-8.08 m, 底面高程-18.23~-11.46 m, 钻孔揭露厚度 1.6~5.7 m。③淤泥质粉质黏土 (Q^4_m), 黑灰色, 饱和, 软塑, 局部可塑, 具腥臭味, 偶见贝壳碎片, 无摇震反应, 干强度中等, 韧性中等, 顶面

表 1 土层物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical property indexes of soils

土层	含水率 /%	重度 /($kN \cdot m^{-3}$)	孔隙比	压缩系数 /(MPa^{-1})	压缩模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)
流泥	86.7	15.4	2.212	2.59	1.24	1.31	0.80
淤泥	63.4	16.2	1.732	1.46	1.87	1.62	1.40
淤泥质粉质黏土	53.8	16.9	1.461	1.19	2.10	2.52	1.56

高程-18.23~-11.46 m, 底面高程-21.75~-15.06 m, 钻孔揭露厚度 1.8~5.6 m。主要压缩土层物理力学性质指标见表 1。

2 现场加载试验方案

根据工程特点, 本次加载试验方案共设计了 4 组对比试验, 以便探讨加载与地基变形之间的关系, 得到合理的加载方式。

(1) 试验 1^{#1~#3} 圆筒内和圆筒后方荷载施加是按照 2.0 m 厚度作为一级荷载, 按照 30 d 时间间隔进行的加载控制。

(2) 试验 2^{#4~#6} 圆筒内和圆筒后方荷载施加是按照 4.0 m 厚度作为一级荷载, 加载时间间隔按 90 d 控制。

(3) 试验 3^{#7~#9} 圆筒内和圆筒后方荷载施加是按照 4.0 m 厚度作为一级荷载, 加载时间间隔按 60 d 控制。

(4) 试验 4^{#10~#12} 圆筒内和圆筒后方荷载施加是按照 4.0 m 厚度作为一级荷载, 加载时间间隔按 45 d 控制。

本次试验圆筒设计顶标高最终控制在 4.0 m 左右, 底标高约为-3.5 m。在安装圆筒时, 考虑地基沉降变形的影响, 安装圆筒底标高约为-2.5 m, 顶面标高 5.0 m。潮位常年为 0.6~3.8 m 波动。圆筒满载时, 基床顶面荷载值为 118.0~90.0 kPa。由此可见, 荷载值随潮汐涨落, 而有规律的起伏。潮位最低时, 圆筒底面荷载值最大, 为最不利情况。为便于比较, 现以最不利情况为例, 对 4 组加载试验进行讨论。

试验 1 以 2.0 m 作为一级荷载进行加载, 在水下时一次加载量不超过 30.0 kPa (水下抛石密度按 $1.0 g/cm^3$), 以安装圆筒同时进行第一次筒内加载为不利情况。水上加载一次加载量约为 40.0 kPa, 从加载量大小可知, 水上加载风险大于水下加载。

试验 2, 3, 4 以 4.0 m 作为一级荷载进行加载, 加载次数明显减少, 从安装圆筒到满载共进行 4 次, 其中水下加载量最大值约 50.0 kPa, 不利情况与试验 1 相同。水上每次加载量约 68.0 kPa, 风险较试验 1 加大。

对比试验 2, 3, 4, 圆筒加载过程和加载量不变, 但加载的间隔时间不同, 其中试验 3 间隔时间最长, 试验 4 间隔时间最短。可知试验 4 加载风险最大。

3 监测点布置及结果分析

3.1 监测点布设

为了检验加载试验的合理性, 同时对施工进行有效控制, 在圆筒下布设测点观测垂直沉降和水平位移, 测点布置在每个圆筒前趾(北侧)和后趾(南侧)正下方的土体内; 孔隙水压力测点布置在靠近圆筒后趾 2.0 m 处, 具体布置测点位置见图 2。

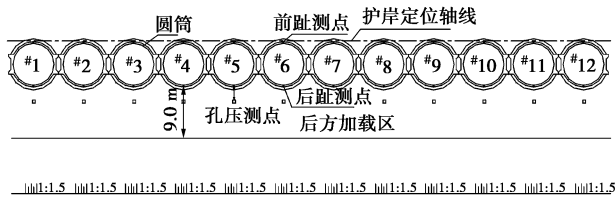


图 2 加载试验测点布置

Fig. 2 Monitoring points of loading test

3.2 沉降分析

(1) 加载方式对沉降影响

一般来讲, 沉降过程曲线不仅能够反映加载的大小, 而且更能反映地基的稳定情况。图 3 为沉降与加载变化曲线, 分别对应加载试验 1~试验 4。从 4 组试验可知在圆筒安装时, 沉降速率(平均每日沉降量)较大, 4 组试验均超过 10 mm/d, 其中试验 1 较其他 3 组试验偏小, 这是由于安装圆筒与筒内第一次加载同时进行, 而试验 1 筒内加载最小。

在进行筒内加载时, 试验 1 沉降速率相对其他 3 组试验偏小, 加载完成后总沉降量最小, 这主要是荷载总量一定而荷载分级较其它 3 组试验多出 1 倍造成的, 同时说明荷载分级对最终沉降量有重要影响, 适当的增加荷载分级对总沉降量的控制较为有利, 但过多的荷载分级不利于实际的施工作业。

试验 2, 3, 4 加载过程相似, 在筒内第二级加载前, 3 组试验的沉降速率分别为 2.5, 3.0, 5.2 mm/d。而在进行筒内第二级加载时试验 4 沉降对加载反应最明显, 试验 3 反应次之, 试验 2 反应最小, 这主要是由于 3 组试验加载间隔期不同, 地基土体排水固结程度不同造成的, 同时这也造成了最终沉降量的不同, 第二级加载与第一级加载的时间间隔越短, 最终沉降量越大。

由图中还可以看出, 试验 4 在 47 d 时沉降发展突然加剧。根据监测数据, 沉降速率为 48.4 mm/d, 但 60 d 时, 沉降速率减少到 11.1 mm/d, 沉降发展经历

约 75 d 后呈现收敛趋势, 说明圆筒内第二级加载间隔时间过短, 土体遭到局部剪切破坏, 但未形成完整滑动面。

由上述分析可知, 为避免地基在加载过程中出现变形破坏, 当沉降速率小于 5.0 mm/d 时认为地基基本稳定, 可以进行下一级加载; 同时考虑到海上实际加载作业的难度较大, 应尽量减少荷载分级和控制加载间隔周期。因此, 试验 3 可以作为加载作业的最优方案用于实际施工。

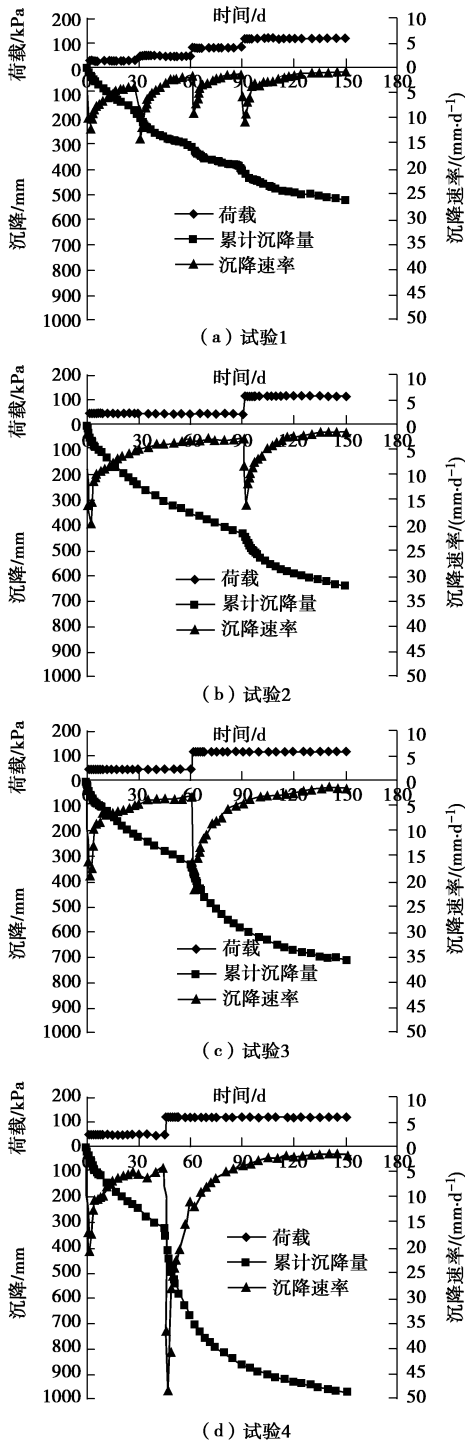


图 3 沉降与加载过程曲线

Fig. 3 Process curves of settlement and loading

(2) 不均匀沉降分析

由于圆筒两侧加载厚度的不同, 将造成圆筒两侧的不均匀沉降。从图 4, 5 可以直观的看出: 圆筒南北两侧的不均匀沉降主要是最后一级筒外加载引起的, 试验 1, 2 与另外两组试验相比, 圆筒两侧高差较小, 大部分圆筒高差控制在 220 mm 以内。试验 4 圆筒两侧高差最大, 其中#10~#12 圆筒高差已超过 340 mm。对比加载过程可知, 加载量越小, 两次加载的时间间隔越长, 圆筒两侧高差越小。

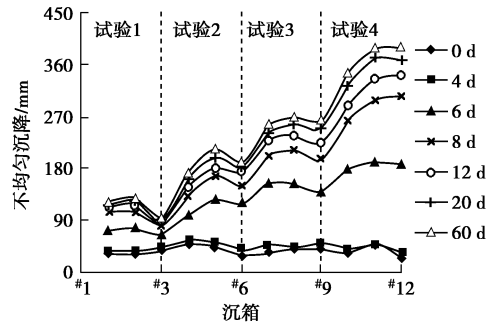


图 4 圆筒不均匀沉降发展过程曲线

Fig. 4 Curves of non-uniform settlement of cylindrical structure

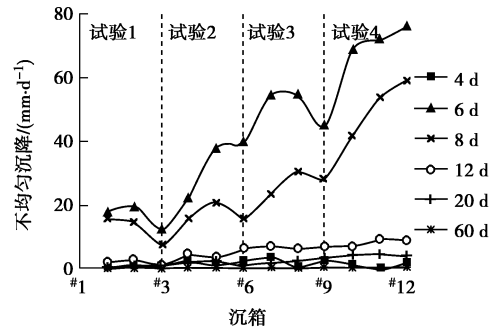


图 5 圆筒不均匀沉降速率发展过程曲线

Fig. 5 Curves of non-uniform settlement rate of cylindrical structure

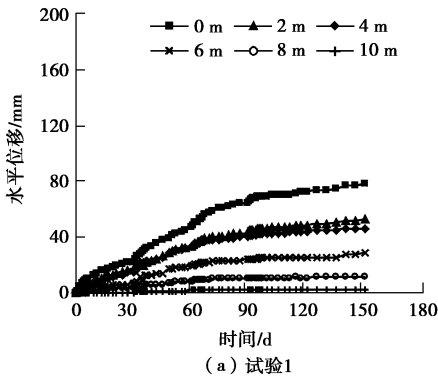
为了更好地说明 4 组加载试验前后地基变形情况, 现结合圆筒两侧不均匀沉降发展过程作进一步讨论。从不均匀沉降的发展过程看大体经历了 3 个时期: ①筒外最后一级南侧(后趾一侧)加载前, 圆筒两侧不均匀沉降较小, 4 组试验均在 80 mm 以内; ②圆筒外最后一级南侧加载后前 4 d 内沉降差显著增加; ③加载 4 d 后, 不均匀沉降发展逐渐变缓。根据现场试验方案, 4 组试验圆筒外北侧加载均为 2.0 m, 在进行最后一级筒外加载时, 试验 1 圆筒两侧的荷载厚度相差 4.0 m, 而其它 3 组试验均相差 2.0 m, 但完成上述加载后 4 组试验的不均匀沉降相差无几, 说明圆筒不平衡加载控制在 4.0 m 以内, 不会引起过大的不均匀沉降; 圆筒外最后一级加载后, 4 组试验均表现出不均匀沉降发展显著增加的现象。由此可知圆筒不均匀不仅与加载量及加载的时间间隔有关系, 还与圆筒两侧荷载的厚度差值有关。此外, 在实际进行安装圆筒及第一级筒外加载时, 为了加快工期, 后趾一侧由于

最终要形成陆域, 加载量较前趾侧稍大。

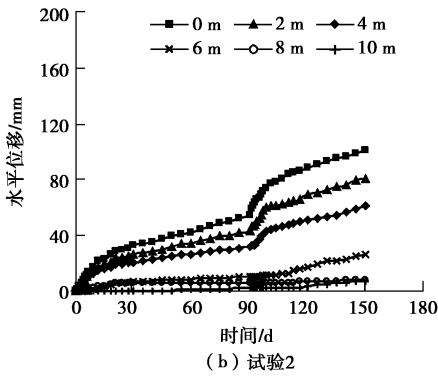
从地基附加应力的角度来看, 在进行第一级加载时, 土体附加应力最大值出现在圆筒结构形心下方的土体顶面。而当后方最后一级加载完毕, 根据 Boussinesq 地基附加应力公式, 最大附加应力出现在圆筒后趾附近, 显然将造成圆筒的前后趾的不均匀沉降。

3.3 水平位移分析

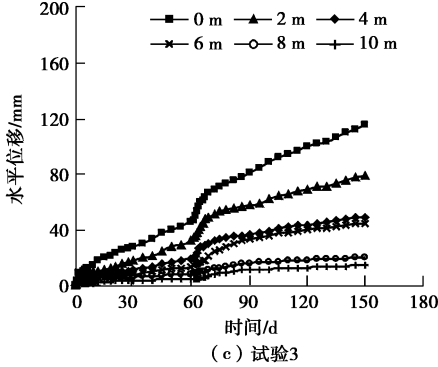
图 6 为 4 组加载试验对应地基不同深度的水平位移过程曲线。从图中可以看出 4 组试验最大水平位移发生在 0.0 m 处, 分别为 78.5, 100.2, 114.5, 165.1 mm, 说明控制荷载分级可以有效地减小水平位移。对比试验 2, 3, 4 发现, 两极荷载间隔时间分别为 90, 60, 45 d, 试验 2, 3 最大水平位移相差 14.3 mm, 而试验 3, 4 相差 50.6 mm, 说明延长两级荷载之间的间隔时间, 对控制水平位移有利, 且当两极荷载间隔时间过短时对地基稳定不利。通过对比还发现, 试验 2 土体水平位移的“敏感”深度为 4.0 m, 试验 3 发展到 6.0 m, 而试验 4 发展到 8.0 m, 说明两级荷载的时间间隔越短, 对水平位移影响越深。



(a) 试验1



(b) 试验2



(c) 试验3

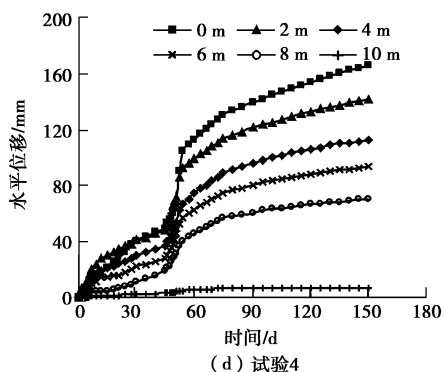


图6 地基水平位移过程曲线

Fig. 6 Curves of horizontal movement of foundation

此外, 根据有关文献, 地基水平位移最大值一般出现在接近顶部的某处, 而本次加载试验测的水平位移最大值均出现在软基顶部。分析原因为水平位移计埋设在圆筒护岸之下, 上部有 4.0 m 厚的抛石基床, 该部分土体基本接近松散状态, 存在一定的沉降和水平位移, 因此从基床顶面算起, 地基的最大位移发生在距基床顶面 4.0 m 的位置。

3.4 孔隙水压力分析

4 组加载试验的孔隙水压力曲线如图 7 所示。图 7 (a) 为孔隙水压力原始监测资料, 从图中可知在不考虑水深和潮汐作用的情况下, 孔隙水压力波动较大, 较难判断土体孔隙水压力的消散情况。为了消除水深及潮汐作用对加载试验产生的超孔隙水压力的影响, 在施工影响区外同样深度埋设 1 组孔压计, 得到如图

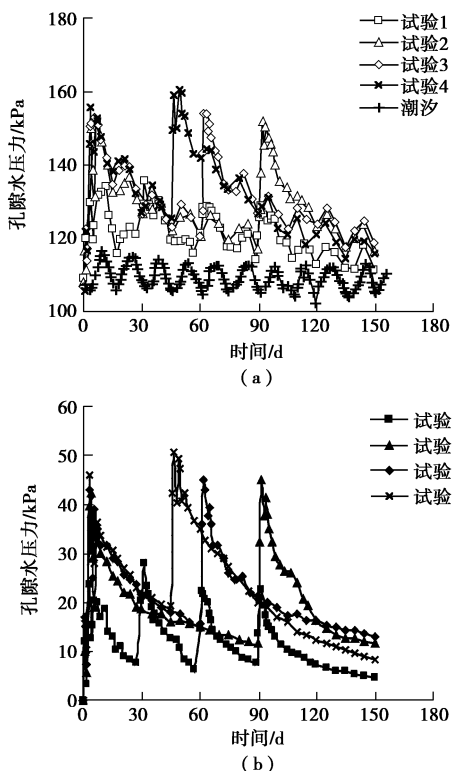


图7 地基孔隙水压力曲线

Fig. 7 Curves of pore water pressure of foundation

7 (a) 监测数据, 从图中可以看出孔隙水压力随潮汐作用有规律的起伏, 但起伏的幅度较潮汐的小, 一般为潮汐起伏的 0.3~0.4 倍。

图 7 (b) 为消除潮汐作用的孔隙水压力曲线, 通过与图 7 (a) 对比发现, 孔隙水压力的波动明显减小。但值得注意的是在进行第一级加载时, 土体的超孔隙水压力最大值不出现在加载的当日, 而是在 3 d 时达到峰值。此外, 超孔隙水压力在第一级加载后, 在前 6 d 有较大起伏, 规律不明显, 6 d 之后按超孔隙水压力消散规律逐渐减小。

4 结 语

半直立式圆筒护岸圆筒两侧每级荷载加载量及两级荷载之间的间隔时间对地基沉降有重要影响, 每次加载量越小, 两次加载的时间间隔越长, 对地基变形和稳定越有利。

圆筒后方最后一级加载对圆筒的不均匀沉降影响最大, 如果该级荷载控制不当便会引起地基过大的不均匀沉降, 因此为控制地基不均匀沉降过大发展, 圆筒后方加载应在低潮位时分多级加载。

圆筒安装期间沉降发展较大, 这主要是由于圆筒为无底结构, 底部与基床接触面积小, 应力相对集中, 使得基床压实和软基沉降同时发生, 表现为沉降速率在安装后一定时间内 (2~3 d) 较大。

在进行半直立圆筒护岸地基水平位移分析时, 可将抛石基床与下部软土层看作双层地基, 分层水平位移的最大值一般出现在双层地基分界面软土层一侧。且加载速率对分层水平位移的“敏感”深度影响较大。

在不消除潮汐作用的情况下, 难以判断超孔隙水压力的消散情况。可在施工影响区外埋设对比孔压计, 得到潮汐作用下孔隙水压力的波动情况, 同时消除潮汐作用及水深的影响, 得到合理的超孔隙水压力消散规律。

总之, 在进行圆筒加载时应着重从以下几方面控制: 适当的减少每级加载量并延长两次加载的时间间隔, 适当增加基床厚度并增加基床排水固结时间, 可以达到控制沉降的目的; 而增加加载时间间隔, 同时控制筒外后方最后一级荷载加载量, 筒外前方荷载先于后方加载, 对不均匀沉降控制是有利的。

参考文献:

- [1] 刘建起, 吕宝柱. 非沉入式无底圆筒结构基底应力及抗倾稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(1): 32 - 37. (LIU Jian-qi, LÜ Bao-zhu. Study on base stress and resistance to overturning of open cylindrical non-buried structures[J].

- Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(1): 32 - 37. (in Chinese))
- [2] 王元战, 华蕾娜, 祝振宇. 软土地基条件下大型圆筒海岸结构稳定性计算方法[J]. 岩土力学, 2005, **26**(1): 41 - 45. (WANG Yuan-zhan, HUA Lei-na, ZHU Zhen-yu. Stability calculation methods of large cylinder structure in coastal soft clay foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(1): 41 - 45. (in Chinese))
- [3] SUN Ka-li, ZHOU Xi-ren, QIAN Rong. The working mechanism and analytic method of deep embedded large cylinder structure[J]. China Ocean Engineering, 2004, **18**(2): 221 - 118.
- [4] 王 刚, 陈 杨, 张建民. 大圆筒结构倾覆稳定分析的有限元法[J]. 岩土力学, 2006, **27**(2): 238 - 241. (WANG Gang, CHEN Yang, ZHANG Jian-min. Finite element method for analyzing overturn stability of large cylindrical structure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(2): 238 - 241. (in Chinese))
- [5] 肖 忠, 王元站, 及春宁. 波浪作用下加固软基上大圆筒结构稳定性分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(8): 2648 - 2654. (XIAO Zhong, WANG Yuan-zhan, JI Chun-ning, et al. Stability analysis of large cylindrical structure for strengthening soft foundation under wave load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(8): 2648 - 2654. (in Chinese))
- [6] 竺存宏. 使用极限状态大圆筒土压力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(3): 313 - 318. (ZHU Cun-hong. Computation of earth pressure on large diameter cylinder under service ultimate state[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(3): 313 - 318. (in Chinese))
- [7] 陈福全, 龚晓南, 竺存宏. 大直径圆筒码头结构土压力性状模型试验[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(1): 72 - 75. (CHEN Fu-quan, GONG Xiao-nan, ZHU Cun-hong. Analysis of the model test of cylindrical wharf structure with large diameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(1): 72 - 75. (in Chinese))
- [8] XU Guang-ming, Charles W. W. Ng. Dimensional analysis and centrifuge modeling of quay wall of large-diameter bottomless cylinders[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(10): 1544 - 1552.
- [9] 王元战, 迟丽华. 沉入式大直径圆筒挡墙变位计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(3): 44 - 49. (WANG Yuan-zhan, CHI Li-hua. Study on calculating approach to displacements of large diameter cylindrical wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(3): 44 - 49. (in Chinese))
- [10] 刘建起. 沉入式大直径圆筒结构变形计算的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(2): 64 - 72. (LIU Jian-qi. Deformation of large-diameter cylindrical buried structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(2): 64 - 72. (in Chinese))
- [11] 王元战, 王海龙, 付瑞清. 沉入式大直径圆筒码头稳定性计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(4): 417 - 420. (WANG Yuan-zhan, WANG Hai-long, FU Rui-qing. Method of stability analysis of embedded large-diameter cylinder quay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(4): 417 - 420. (in Chinese))